Ueber die Abhängigkeit der Energieverteilung und Wellenlänge der Reststrahlen von den Versuchsbedingungen.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

GENEHMIGT

VON DER PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT

ZU BERLIN.

Von

Herbert Hollnagel
aus Boston (Mass. in Amerika).

Tag der Promotion: 13. August 1910.

Referenten:
Prof. Dr. **H. Rubens.**
Prof. Dr. **M. Planck.**

Emil Ebering, Berlin NW., Mittelstraße 39.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung 5

Die Versuche.

Die Methode und das Interferometer 6

Versuchsanordnung 8

Das Mikroradiometer 10

Erzeugung der Reststrahlen 15

Ausführung der Versuchsreihen 16

Ergebnisse der Interferenzkurven 20

Energieverteilung 23

Diskussion der Resultate 27

Zusammenfassung 32

Tafeln 35

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41533914_0111

Einleitung.

Der Nachweis, daß längere Wellen durch mehrfache Reflexion an einer anomal dispergierenden Substanz isoliert werden können, hat unsere Kenntnis des ultraroten Spektrums bedeutend gefördert[1]. Diese Methode ermöglichte es, die längsten bisher bekannten ultraroten Wellen zu erhalten in den Reststrahlen von Flußspath[2], Steinsalz, Sylvin[3], Bromkalium und Jodkalium[4].

Da bei den meisten bisherigen Messungen ein Auerbrenner als Strahlungsquelle diente und fast immer nur vier bezw. fünf Reflexionen an der betreffenden Substanz benutzt wurden, erschien es von Interesse, näher zu untersuchen, inwieweit sich die Wellenlängen, wie auch die Homogenität der Strahlen mit der Zahl der reflektierenden Flächen und mit der Wahl der Lichtquelle ändern.

Es ist das Ziel der vorliegenden Untersuchung, durch Anwendung einer Interferenzmethode die Energieverteilung der Reststrahlen von Steinsalz und Sylvin unter möglichst verschiedenen Bedingungen zu bestimmen.

---

1. H. Rubens u. E. J. Nichols, Wied. Ann. 60 p. 418, 1897.
2. H. Rubens u. E. Nichols, Wied. Ann. 60, p. 418, 1897.
3. H. Rubens u. E. Aschkinaß, Wied. Ann. 65, p. 241—256, 1898.
4. H. Rubens u. H. Hollnagel, Sitz. Ber. d. Kön. Preuß. Akad. d. Wiss. IV p. 26, 1910.

Die Versuche.

Die Methode und das Interferometer.

Die hier benutzte Methode ist im wesentlichen dieselbe, welche Herr Prof. Rubens und ich verwendet haben, um die Wellenlänge der Reststrahlen von Bromkalium und Jodkalium zu ermitteln[5]. Da die Ausarbeitung dieser Methode zum Teil durch Ausführung der hier beschriebenen Versuche veranlaßt worden ist, so erscheint es angebracht, auf die Einzelheiten der Methode etwas näher einzugehen. Bisher ist immer die Gitterspektrometer-Anordnung zur Messung der Wellenlängen im äußersten Ultrarote verwendet worden, welche bei Benutzung sehr empfindlicher Strahlungsempfänger, eben noch ausreichte, sichere Resultate zu liefern. Da indessen die Energiemenge in dem langwelligen Bereich des Spektrums außerordentlich gering und das Gitterspektrum an sich nur sehr lichtschwach ist, so ließen sich an die Genauigkeit solcher Gittermessungen keine sehr hohen Anforderungen stellen. Bessere Aussicht versprach die Anwendung einer Interferenzmethode[5], welche bedeutend lichtstärker ist, als die Spektrometermethode, hauptsächlich deshalb, weil die Einschnürung des Strahlenbündels an den Spalten vermieden wird.

Als notwendig ergibt sich hierbei die Verwendung einer Substanz, die für Strahlen jenseits 45 μ in hinreichend dicken Schichten genügende Durchlässigkeit besitzt. Hierzu

---

5. l. c. 4. p. 1.

eignet sich Quarz, der außerdem den Vorteil eines sehr hohen Berechnungsexponenten bietet.

Das benützte Interferometer besteht im wesentlichen aus einer durch zwei planparallele Quarzplatten begrenzten Luftschicht. In Fig. 1 ist das Instrument schematisch ge-

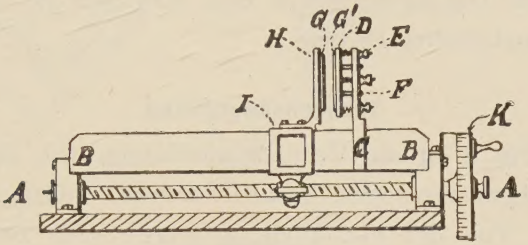


Fig. 1.

zeichnet. Die Dicke der Luftschicht konnte verändert und genau gemessen werden, was dadurch erreicht wurde, daß die Platten mittels einer Schlittenführung I auf der prismatischen Schiene B—B einer kleinen Teilmaschine A—A montiert waren. Drehen des Trommelkopfes K bewirkt ein Auseinanderrücken oder Nähern der Platten. Auf der Schiene B—B ist der Messingträger C festgeklemmt; in seinem oberen Teil ist dieser plattenförmige Träger C zu einem Ring von 5,5 cm lichter Weite ausgedreht und trägt mittels dreier Regulierschrauben E, sowie mittels dreier Führungsstifte F den Messingring D, von welchem die eine der beiden Quarzplatten G gehalten wird, die die planparallele Luftschicht begrenzen. Die andere Quarzplatte G ist gleichfalls in einen Messingring H gefaßt, welcher direkt auf den Schlitten I der Teilmaschine aufgeschraubt ist. Die Platten waren senkrecht zu den optischen Achsen geschliffen und 0,6 mm dick. Die Ganghöhe der Schraube betrug im Mittel 0,5228 mm; der Trommelkopf K der Schraubenspindel war in 100 Teile geteilt, so daß einer

Drehung um einen Teil eine Verschiebung des Schlittens um 5,23 μ entspricht.

Unter Berücksichtigung des hohen Brechungsexponenten des Quarzes für große Wellenlängen berechnet sich eine Intensitätsschwankung von 43 % für eine homogene Strahlung beim Durchgang durch eine planparallele Luftschicht von veränderlicher Dicke.

Versuchsanordnung.

In Fig. 2 ist die Versuchsanordnung, wie sie zu den Wellenlängenmessungen benutzt wurde, vollständig dargestellt. Von der Lichtquelle A wurde nach zweimaliger Reflexion an den Flächen F_1 und F_2 der betreffenden Substanz durch den Hohlspiegel B auf den mittleren Teil der Luftplatte C des Interferometers ein Bild entworfen. Nach Passieren des Interferenzapparates kommt die dritte und vierte Reflexion der Strahlen zustande an den beiden Kristall-Flächen F_3 und F_4. Bei D befindet sich ein Klappschirm, der vom Orte des Beobachters aus betätigt wurde. Ist der Schirm hochgezogen, so treten die Strahlen in das Innere des Kastens K, der die übrigen reflektierenden Flächen F_5—F_8 enthält und außerdem den Hohlspiegel G, der die Strahlen auf die Lötstelle des Thermoelements im Mikroradiometer vereinigt. Das Mikroradiometer befand sich in einer Juliusschen Aufhängung, die Herr Geheimrat Hagen mir in liebenswürdigster Weise zur Verfügung stellte, wofür ich ihm an dieser Stelle meinen herzlichen Dank aussprechen möchte.

---

6. Für $\lambda = 56\,\mu$ beträgt der Brechungsexponent von Quarz 2,18 und strebt mit zunehmender Wellenlänge dem Wert 2,15 zu. H. Rubens u. E. Aschkinaß, Ann. d. Phys. u. Chem. 67, 5, 545, 1899.

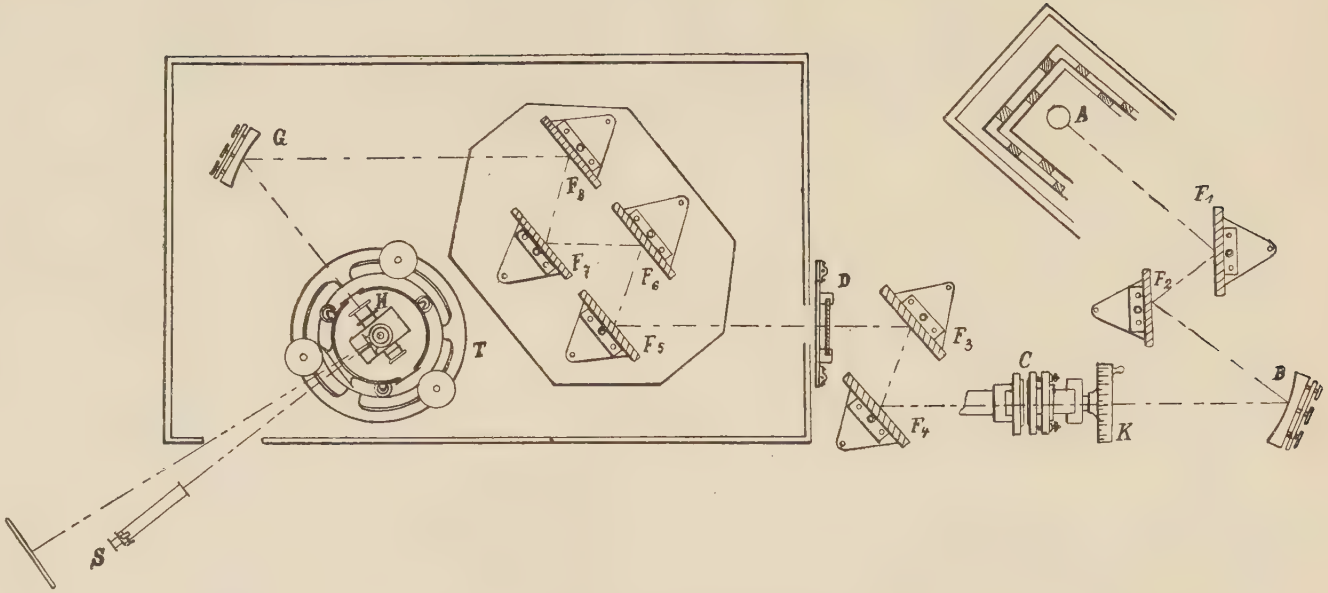


Fig. 2.

Das Mikroradiometer.

Das Mikroradiometer ist im wesentlichen dasselbe wie es Herr Schmidt im hiesigen Institut konstruiert hat[7]. Doch ist eine kurze Beschreibung an dieser Stelle nicht überflüssig, weil einige Verbesserungen daran angebracht sind. Das Instrument ist in Fig. 3 skizziert.

Das ihm zugrunde liegende Prinzip ist bekanntlich eine Vereinigung von Thermoelement und Drehspulen Galvanometer: Ein durch das Thermoelement M geschlossener Stromkreis A befindet sich in dem magnetischen Feld zwischen den beiden Polschuhen B des U-förmigen Stahlmagneten D. Die durch Bestrahlung hervorgerufene Erwärmung der einen Lötstelle bewirkt so eine Drehung des Stromkreises, d. h. einen Ausschlag des Instrumentes, letzterer wurde in üblicher Weise mittels Spiegel, Skala und Fernrohr abgelesen (cf. Fig. 2).

Das System ist an einem Aluminiumstift E, der einen kleinen Silberspiegel F trägt, angekittet und hängt an einem Quarzfaden G, der in dem Torsionskopf H befestigt ist. Die Schrauben K mit den zugehörigen Messingklötzen ermöglichen eine bequeme Justierung des Systems in der vertikalen Richtung. Die Kammer P sollte dazu dienen, stärkere Luftströmungen zu vermeiden. In ihrer Vorder- und Hinterwand befindet sich je eine Oeffnung, deren eine eine genaue Einstellung der Lichtquelle auf das Thermoelement mit Hilfe der Lupe L gestattet und deren andere zur Aufnahme eines innenhochglanzpolierten Messingkonus N dient, der eine Konzentration der Strahlung bewirkt.

Da das Instrument an manchen Tagen einen unruhigen Nullpunkt zeigte, wurden diese Schwankungen zum Gegen-

7. Berl. Diss. März 1909. Ann. d. Phys. Bd. 29. p. 971, 1909.

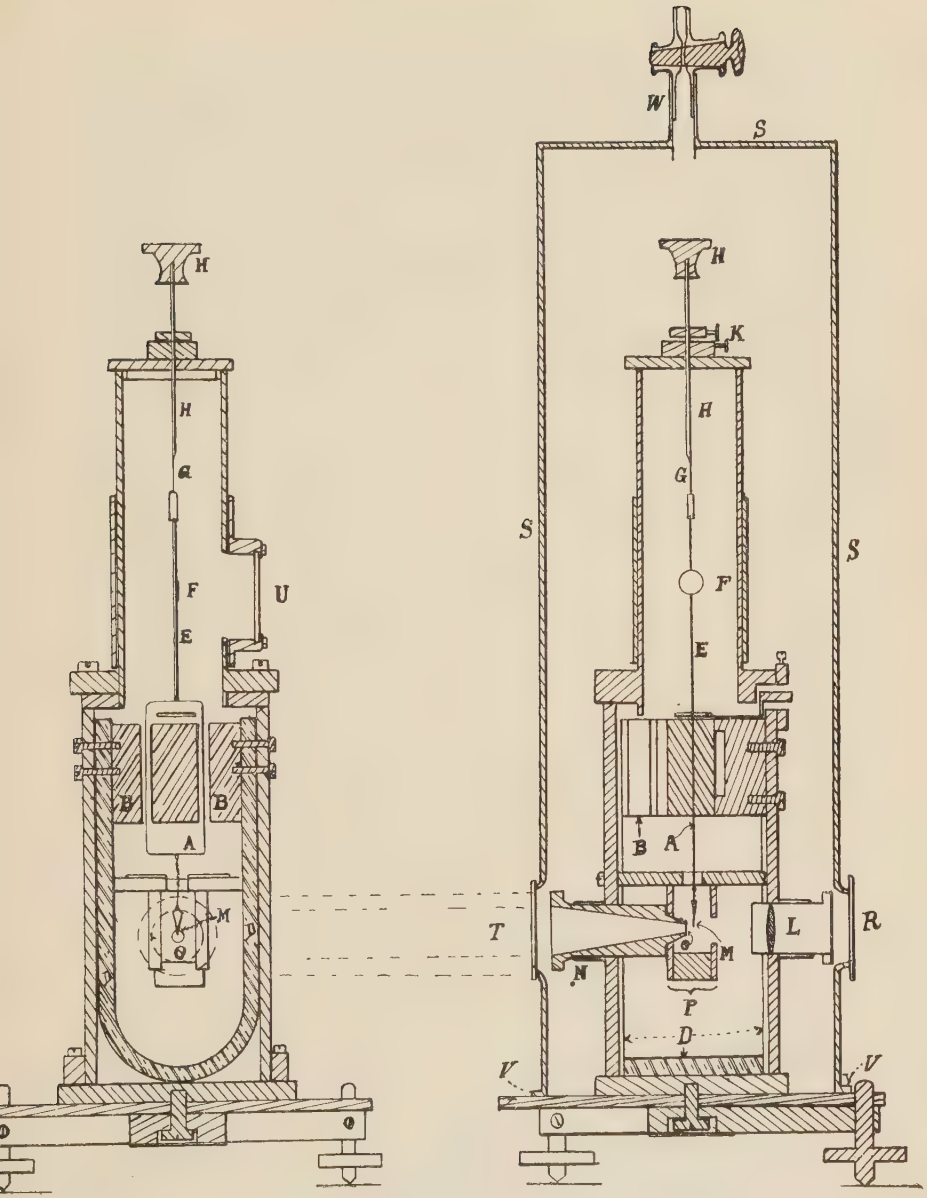


Fig. 3.

stand einer eingehenden Untersuchung gemacht. Es stellte sich heraus, daß die Störungen hauptsächlich zweierlei Art waren. Erstens wurde eine langsame und meist innerhalb ziemlich großer Zeiträume kontinuierliche Wanderung des Nullpunktes beobachtet, welche in leicht erkennbarer Weise durch die Aenderung der Zimmertemperatur herbeigeführt wurde. Darüber lagerten sich unregelmäßige Nullpunktsstörungen, welche oft in wenigen Sekunden ihre Richtung wechselten und besonders bei unruhigem Wetter sehr stark hervortraten, während sie bei ruhigem windstillem Wetter kaum zu merken waren. Nach mancherlei vergeblichen Versuchen wurde festgestellt, daß diese letzteren Schwankungen von den spontanen Aenderungen des Luftdrucks herrührten.

Durch diese adiabatischen Kompressionen und Dilatationen treten geringe Erwärmungen und Abkühlungen der Luft auf, welche die Schwankungen infolge der ungleichen Wärmekapazität der Lötstellen des Thermoelementes verursachen.

Daß diese spontanen Druckschwankungen der Luft in Wirklichkeit diese Ausschläge hervorriefen, wurde in folgender Weise festgestellt: Stellte man ein Hefner-Alteneckssches Druckvariometer so auf, daß sein Ausschlag gleichzeitig mit dem des Mikroradiometers beobachtet werden konnte (Fig. 3a) und öffnete man rasch die Tür eines Arbeitszimmers, oder auch eines damit in Verbindung stehenden Raumes, wodurch man eine Druckwelle erregte, dann gab das Variometer unmittelbar nach dem Druckstoß einen Ausschlag nach rechts, langsam danach folgend kam stets ein Ausschlag des Mikroradiometers nach links. Schloß man dagegen plötzlich die Tür, so gab das Hefner-Alteneck-

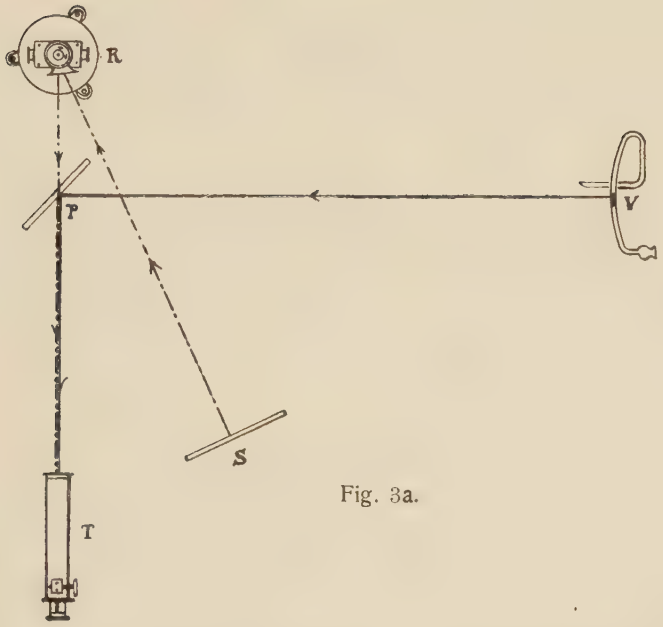


Fig. 3a.

Instrument einen Ausschlag nach links und das Mikroradiometer einen entsprechenden Ausschlag nach rechts. Bei stürmischer Witterung konnte von genauen Beobachtungen keine Rede sein. Die Störungen betrugen oft mehrere Millimeter, bei windstillem Wetter dagegen konnten die Ablesungen bis auf 0,2 mm genau vorgenommen werden. Daß diese Schwankungen nicht durch Luftströmungen hervorgebracht wurden, wurde dadurch bewiesen, daß die Ausschläge des Mikroradiometers fast ebenso groß waren falls ähnliche Versuche mit der Tür eines weit entfernten Nebenzimmers vorgenommen wurden, während zwei zwischen diesem und dem Arbeitszimmer liegende Türen geschlossen waren.

Um ferner zu beweisen, daß solche Druckwellen sich auch durch die geringsten Oeffnungen fortpflanzen und infolgedessen das Instrument dicht abgeschlossen sein muß, um solche Störungen zu vermeiden, stellte man folgenden Versuch an. Ein Druck-Variometer wurde unter einer Glocke aufgestellt, die dicht abgeschlossen war. Vermittels eines Glashahnes mit angesetzter sehr feiner Kapillare konnte das Innere der Glocke in Verbindung mit der freien Luft gebracht werden. Ein zweites Variometer ohne Glocke befand sich neben dem ersten, so daß man beide zu gleicher Zeit beobachten konnte.

Nun wurden die obengenannten Versuche mit der Tür wiederholt, und zwar mit geöffnetem und geschlossenem Hahn der Glocke. Bei geöffnetem Hahn zeigte es sich, daß das unter der Glocke befindliche Variometer einen Ausschlag gab, der dem des anderen Instrumentes nahezu gleich war, während bei geschlossenem Hahn kein Ausschlag bemerkbar war. Daraus läßt sich schließen, daß das Mikroradiometer vollkommen luftdicht abgeschlossen sein muß, um diese Störungen zu beseitigen.

Zu diesem Zwecke diente eine zylindrische Messingglocke S, die auf eine Grundplatte V aufgeschliffen war. An drei Stellen ist sie mit Fenstern versehen, welche mit Glas- bezw. Quarzplatten geschlossen sind. Durch die eine, die dem Fenster des Mikroradiometers U entspricht, werden die Ausschläge mittels Fernrohr abgelesen. Dasjenige an der Stelle R benutzte man nur zur Einstellung der Strahlen auf das Thermoelement. Das dritte Fenster, durch welches die Strahlen in den Konus eintreten, ist mit einer 0,5 mm dicken Quarzplatte von 3 cm Durchmesser verschlossen.

Hierdurch gehen die Strahlen wie oben schon gesagt, ohne erhebliche Absorption hindurch. Durch den Hahn W wird das Innere bis auf einen Unterdruck von 10 cm gegen die Atmosphäre ausgepumpt, damit man eine sicherere Dichtung gewinnt.

Das Mikroradiometer mit Konus und dieser Glocke versehen, gab für eine Kerze in 6 m Entfernung 70 Skalenteile Ausschlag bei 3 m Skalenabstand und einer Ausschlagdauer von 11 Sekunden.

Bei Verwendung der Glocke überstiegen die Fehler der Beobachtungen selten 0,1 mm.

Erzeugung der Reststrahlen.

Der Untersuchung unterworfen wurden die Reststrahlen von Steinsalz und Sylvin. Die Reststrahlen wurden in der bekannten Weise erzeugt, indem man die Strahlung an 4 bezw. 6 oder 8 Flächen aus Steinsalz bezw. Sylvin reflektieren ließ. Die Steinsalzplatten wurden von einem großen Würfel vollkommen klaren Materials abgespalten, danach plan geschliffen und hoch poliert. Das Material für die Sylvinplatten stellte mir in liebenswürdiger Weise Herr Prof. Precht aus Staßfurt zur Verfügung. Es hatte ein milchweißes Aussehen und zeigte kristallinische Gefüge. Vier Platten waren aus einem Block geschnitten, welcher 2 % Na Cl enthielt, während die übrigen 4 Platten aus etwas unreinerem Material von 4 % Chlornatriumgehalt bestanden. Trotzdem die Kristalle sehr spröde waren, ließ sich das Material plan schleifen und zu sehr gut reflektierenden Oberflächen polieren.

Zur Einstellung der Reststrahlen bei 4- und 6facher

Reflektion wurden auf die Flächen F_1 und F_2 bezw. F_3 und F_4 vorderseitig versilberte Spiegel gelegt.

Ausführung der Versuchsreihen.

Vor Beginn einer Messungsreihe wurden die Quarzplatten mit Hilfe der Regulierungsschrauben E (Fig. 1) angenähert parallel gestellt und durch Drehung des Trommelkopfes K der Teilmaschine in Berührung gebracht. Im reflektierten Natriumlicht zeigten sich jetzt unregelmäßige konzentrische Interferenzringe. Drehte man die Trommel im Sinne der Entfernung der Platten, so zogen sich die Ringe nach dem Zentrum hin zusammen. Das ganze Interferenzsystem verschob sich hierbei öfters um einige Streifenbreiten, aber niemals um eine in Betracht kommende Entfernung. Dadurch war bewiesen, daß keine merklichen Fehler durch die Unregelmäßigkeiten in der Schlittenführung eintreten konnten.

Nun wurden die Platten wieder bis zur Berührung genähert und die Teilmaschine um den Betrag des toten Ganges der Schraube zurückgedreht. Eine weitere Drehung im letztgenannten Sinne mußte jetzt eine Entfernung der Platten verursachen. Nunmehr konnten die eigentlichen Messungen beginnen: Es wurden mehrere Ausschläge des Mikroradiometers abgelesen, dann die Trommel um einen Teilstrich im Sinne der Entfernung der Platten weitergedreht und wiederum eine Reihe Ausschläge gemessen: In dieser Weise wurde fortgefahren, bis das Interferenzbild vollkommen aufgenommen war.

Eine solche ausgeführte Reihe ist als Beispiel der Beobachtungen in Tabelle 1 angegeben. Sie bezieht sich auf die Reststrahlen von Sylvin bei achtfacher Reflexion:

Tabelle I.

Trommel-Teile	Beob. 1 mm	Beob. 2 mm	Beob. 3 mm	Mittelwert mm
93	3,4	3,4	3,4	3,40
92	3,3	3,4	3,4	3,36
91	3,5	3,4	3,4	3,43
90	3,8	3,7	3,7	3,73
89	4,3	4,4	4,4	4,36
88	4,7	4,6	4,7	4,66
87	4,3	4,3	4,3	4,30
86	4,0	4,0	4,0	4,00
85	3,4	3,5	3,5	3,46
84	3,7	3,8	3,7	3,73
83	4,0	3,9	3,9	3,93
82	4,5	4,4	4,4	4,43
81	4,2	4,1	4,1	4,13
80	3,7	3,8	3,8	3,76
79	3,7	3,6	3,6	3,63
78	3,6	3,6	3,6	3,60
77	3,8	3,7	3,7	3,73
76	4,2	4,2	4,2	4,20
75	4,0	4,0	4,0	4,00
74	3,9	3,7	3,7	3,77
73	3,7	3,7	3,7	3,70
72	3,8	3,9	3,8	3,83
71	4,1	4,0	4,1	4,06
70	4,1	4,1	4,1	4,10

Trommel-Teile	Beob. 1 mm	Beob. 2 mm	Beob. 3 mm	Mittelwert mm
69	3,9	3,9	3,9	3,90
68	3,8	3,9	3,8	3,83
67	3,7	3,8	3,8	3,76
66	3,9	3,8	3,9	3,86
65	3,9	4,0	4,1	4,00
64	4,2	4,1	4,1	4,13
63	3,8	3,8	3,8	3,80
62	3,7	3,7	3,8	3,73
61	3,6	3,6	3,6	3,60
60	3,8	3,7	3,7	3,73
59	3,9	4,0	3,9	3,93
58	4,0	4,1	4,1	4,06
57	3,8	3,8	3,8	3,80
56	3,7	3,8	3,7	3,73
55	3,5	3,6	3,6	3,56
54	3,7	3,6	3,6	3,63
53	4,2	4,2	4,1	4,16
52	4,3	4,3	4,3	4,30
51	4,0	3,9	4,0	3,96
50	3,8	3,7	3,7	3,73
49	3,6	3,7	3,6	3,63
48	3,8	3,8	3,8	3,80
47	4,1	4,0	4,1	4,06
46	4,3	4,4	4,5	4,40
45	4,0	4,1	4,0	4,03
44	3,7	3,7	3,7	3,70
43	3,5	3,5	3,5	3,50
42	3,6	3,6	3,6	3,60

Trommel-Teile	Beob. 1 mm	Beob. 2 mm	Beob. 3 mm	Mittelwert mm
41	3,8	3,8	3,8	3,80
40	4,2	4,1	4,1	4,13
39	3,9	3,8	3,8	3,83
38	3,7	3,7	3,7	3,70
37	3,6	3,5	3,6	3,53
36	3,7	3,8	3,8	3,76
35	4,0	4,0	4,0	4,00
34	4,1	4,2	4,1	4,13
33	4,1	4,0	4,0	4,03
32	3,8	3,7	3,8	3,76
31	3,6	3,5	3,5	3,53
30	3,7	3,7	3,7	3,70
29	3,9	3,9	3,8	3,86
28	3,8	3,9	3,9	3,86
27	4,0	3,9	3,9	3,93
26	3,9	3,8	3,8	3,83
25	3,7	3,7	3,7	3,70
24	3,8	3,9	3,9	3,86
23	3,9	4,0	4,0	3,96

Ergebnisse der Interferenz-Kurven.

In den Figuren 5—15 sind die Resultate der Versuche dargestellt. Die Kurven 5—12 beziehen sich auf die Reststrahlen von Steinsalz, und zwar stellen die Kurven 5—7 diejenigen Interferenzbilder dar, welche man bei Benutzung eines Auerbrenners als Lichtquelle bei 4-, 6- bezw. 8 facher Reflexion an Steinsalzflächen beobachtete. Aus den Kurven 8—12 sind die erhaltenen Resultate für vierfache Reflexion bei der Verwendung verschiedener Strahlungsquellen zu ersehen, und zwar bezieht sich Kurve 8 auf den Eisenoxydstrumpf; Kurve 9 auf den Thoriumstrumpf; Kurve 10 auf den Vorwärmer des Nernstbrenners; Kurve 11 auf den Bunsenbrenner und Kurve 12 auf den Nernstbrenner.

Fig. 13—15 geben Aufschluß über die Resultate für Reststrahlen von Sylvin bei 4—6 und 8 Reflexionen bei Verwendung des Auerbrenners.

Um die verschiedenen Interferenzkurven für dieselbe Reststrahlenart besser vergleichen zu können, sind alle auf denselben Anfangspunkt umgerechnet. In sämtlichen Kurven sind die Intensitäten als Ordinaten, als Abszissen die Entfernung der Quarzplatten, in Teilen des Trommelkopfes ausgedrückt, aufgetragen. Da die Beobachtungen erst bei einer Dicke der Luftschicht entsprechend 1—2 Skalenteilen der Trommel, zuverlässig wurden, wurde aus dem

Kurvencharakter der Ausschlag für die Dicke Null extrapoliert.

Hätte man es mit einem fast homogenen Strahl von einer bestimmten Wellenlänge zu tun, dann wäre zu erwarten, daß die Höhe der Maxima mit zunehmender Dicke der Luftplatte des Interferometers gleichmäßig und langsam abnehmen würde. Aus allen Kurven ist aber zu ersehen, daß dies keineswegs der Fall ist, und daß es sich hier um zwei Streifen verschiedener Wellenlänge handelt, und zwar um zwei Streifen von verschiedenen Intensitäten. Der eine, der als Hauptstreifen bezeichnet wird, soll λ_1 heißen, sein Begleiter λ_2. Um festzustellen, ob λ_2 langwelliger oder kurzwelliger ist als λ_1, benutzt man folgendes Kriterium. Ist der Hauptstreifen λ_1, von einem kurzwelligeren Trabanten begleitet, dann rücken die Interferenzen an denjenigen Stellen auseinander, wo die zwei Schwingungen nahezu entgegengesetzte Phase haben. Ist aber der Begleiter der langwelligere, dann drängen sich die Interferenzen an diesen Stellen zusammen. Diese Erscheinung wird verwirklicht durch die Zeichnungen in Fig. 4. Kurve A setzt sich aus zwei Kosinuskurven zusammen, deren Perioden sich wie 7 zu 6 verhalten; in Kurve B verhalten sich die Perioden wie 7 zu 8. Erstere entspricht dem Fall eines Begleiters von größerer Wellenlänge, letztere dem Fall eines kurzwelligeren. Man sieht, daß die Interferenzkurven der Reststrahlen von Sylvin dem Typus A, die Interferenzen der Reststrahlen des Steinsalzes dem Typus B zugehören. Dementsprechend kann man die Wellenlänge des Hauptstreifens λ_1 aus der Entfernung A zwei homologer maxima bezw.

minima berechnen. Es ist $\lambda_1 = \frac{A}{n} \cdot 20{,}91$ folglich $\lambda_2 = \frac{A}{n \pm 2} \cdot 20{,}91$ je nachdem, ob der Trabant lang oder kurzwelliger ist, benutzt man das Minus- oder Plus-Zeichen. n ist die Halbwellenzahl für den Hauptstreifen in der Distanz A^8.

---

8. Eine vollständige Diskussion der Kurven usw. befindet sich in der Arbeit: „Messungen im langwelligen Spektrum". H. Rubens und H. Hollnagel, Ber. d. Kön. Preuß. Akad. d. Wiss. IV, p. 26, 1910; Phil. Mag. May 1910, p. 761.

Energieverteilung.

Man kann sich nach einer von Herrn Prof. Rubens angegebenen Methode ein angenähertes Bild von der Energie-

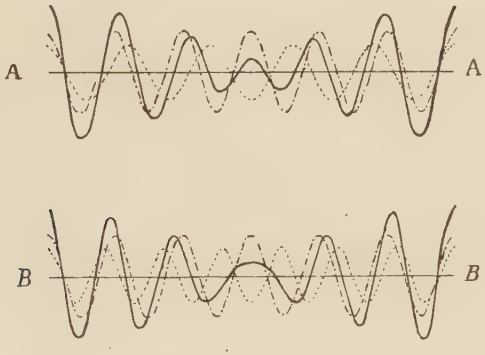


Fig. 4.

verteilung der Reststrahlung machen, wenn man die erhaltenen Kurven betrachtet als Interferenzkurven zweier gedämpfter Sinusschwingungen. Die Intensität dieser beiden Schwingungen sei Φ_1 bezw. Φ_2, ihre logarithmischen Dekremente γ_1 bezw. γ_2. Bezüglich der Bestimmung von Φ_1/Φ_2 und γ_1/γ_2 aus der Interferenzkurve verweise ich auf die ausführliche Veröffentlichung in den Berichten der Berl. Akad.

In Fig. 17—18 und 19—20 sind die Energieverteilungen für Reststrahlen von Steinsalz bezw. Sylvin bei vier- und achtfacher Reflexion abgebildet. Aus Fig. 21—24 sind die Energiekurven für Reststrahlen von Steinsalz bei viermaliger

Reflexion unter Anwendung verschiedener Strahlungsquellen zu ersehen.

Diese Kurven stellen die Energieverteilung nur annähernd dar. Daß die so ermittelte Energieverteilung aber den tatsächlichen Verhältnissen einigermaßen entspricht, läßt sich dadurch zeigen, daß man aus der Kurve der Energieverteilung umgekehrt auf graphischem Wege die Interferenzkurven konstruiert. Wie die Fig. 7a und 15a zeigen, stehen die so berechneten Interferenzkurven mit den durch Messung erhaltenen in guter Uebereinstimmung. Ein genaueres Urteil über die Energieverteilung der Reststrahlen würde man erzielen durch Anwendung folgenden exakten Rechenverfahrens, welches ich einer gütigen Mitteilung des Herrn Geheimrat Planck verdanke. Wenn I_λ die einfallende Intensität ist, x die Dicke der Luftplatte, und I'_λ die austretende Intensität, die eine Funktion von x ist, ist nach der Airyschen Theorie[9]

$$\int_0^\infty I'_\lambda \, d\lambda = \int_0^\infty C \cdot \frac{I_\lambda \, d\lambda}{1 - \alpha \cos \frac{4 \pi x}{\lambda}}$$

wo α ein Konstante, die von dem Reflexionsvermögen abhängt.

Bezeichnet man das Integral $\int_0^\infty I'_\lambda \, d\lambda$ mit I_0 so ist

$$I_0 = \int_0^\infty \frac{C \cdot I_\lambda \, d\lambda}{1 - \alpha \cos \frac{4 \pi x}{\lambda}} \quad (1)$$

Dies Integral stellt die Größe der Energie dar, die man mittels des Mikroradiometers beobachtet. Da $\alpha < 1$, so ist das Integral (1) durch ein Integral einer Reihe dar-

9. Gehrcke, „Anwendung der Indifferenzen“ p. 39.

stellbar. (Als vereinfachende Voraussetzung nehmen wir an, daß nur die Interferenz des direkt durchgehenden und zweimal an den Quarzflächen reflektierten Strahls zu berücksichtigen ist). Dann können die Glieder zweiter und höherer Ordnung vernachlässigt werden, und man erhält:

$$I_0 = \int_0^\infty I_\lambda \, d\lambda \, . \, C \left\{ 1 + \alpha \cos \frac{4 \pi x}{\lambda} \right\}$$

$$= \int_0^\infty I_\lambda \, d\lambda \, . \, C + \int_0^\infty I_\lambda \, d\lambda \, C \alpha \cos \frac{4 \pi x}{\lambda}$$

Zur Abkürzung schreibt man $\underline{\overline{K}} = \int_0^\infty I_\lambda \, C \, d\lambda$ und $P_\lambda = I_\lambda \, . \, C\alpha$, dann lautet die Gleichung folgendermassen:

$$I_0 - \underline{\overline{K}} = \int_0^\infty P_\lambda \cos \frac{4 \pi x}{\lambda} \, d\lambda.$$

Für $x = 0$ wird diese Gleichung

$I_0 = \underline{\overline{K}} + \int_0^\infty P_\lambda \, d\lambda$ und für $x = \infty$ wird $I_0 = \underline{K}$ das heißt $\underline{\overline{K}}$ ist die mittlere Energie, die aus der Kurve zu entnehmen ist.

Nun hat man folgenden allgemeinen Fourierschen Satz:

$$F(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty d\omega \, \{ A_\omega \cos \omega X + B_\omega \sin \omega X \} \quad (2)$$

$$\text{wo } A_\omega = \int_{-\infty}^\infty d_X \, F(X) \cos \omega x \qquad (3)$$

$$\text{und } B_\omega = \int_{-\infty}^\infty d_X \, F(x) \sin \omega x \qquad (4)$$

Setzt man in diese Formeln die Werte:

$$\omega = \frac{4\pi}{\lambda} \quad d\omega = - \frac{4\pi}{\lambda^2} \, d\lambda$$

$$P_\lambda \, d\lambda = A_\omega \, d\omega$$

$$P_\lambda = - A_\omega / \lambda_2$$

dann bekommt man aus (2), (3) und (4)

$$P_\lambda = -\frac{4\pi}{\lambda_2}\int_0^\infty dx\, F(x)\cos\frac{4\pi x}{\lambda} \quad \text{und}$$

$$0 = \int_0^\infty dx\, F(x)\sin\frac{4\pi x}{\lambda}$$

P_λ ist die gesuchte Intensität.

$$P_\lambda = -\frac{4}{\lambda_2}\,\triangle x \sum_{n=0}^{n=\infty} F(x)\,\frac{\cos .\, 4\pi\,(\triangle x \,.\, n)}{\lambda}$$

da $x = n \,.\, \Delta x$ gesetzt ist.

Auf Grund der letzten Formel läßt sich der Verlauf der Energieverteilung, P_λ aus den Interferenzkurven unter den angegebenen Voraussetzungen berechnen. Ich habe die Rechnung vorläufig für die Reststrahlung von Steinsalz durchgeführt und erhielt eine Kurve für die Energieverteilung, die annähernd dieselben Maxima ergab, wie sie nach dem früheren Verfahren erhalten worden waren. Im übrigen zeigten sich beträchtliche Abweichungen besonders in den äußeren Grenzen des Reststrahlgebietes. Worauf diese Abweichungen beruhen, müssen erst weitere Untersuchungen klarlegen.

Zunächst ist es möglich, daß z. B. kleine Fehler der Teilmaschine die Interferenzkurve derart beeinflussen, daß die Zerlegung in Sinusreihen zu falschen Resultaten führt, andererseits ist aber auch denkbar, daß die Nichtberücksichtigung der Glieder höherer Ordnung bei der Reflexion am Quarz, der ja ein ziemlich hohes Reflexionsvermögen besitzt, nicht zulässig ist.

Ich beabsichtige, diese Berechnungen unter Berücksichtigung der Fehlerquellen weiter zu verfolgen.

Diskussion der Resultate.

Die erhaltenen Resultate sind in Tabelle II zusammengestellt.

Tabelle II.

Reststrahlen von	Zahl der Reflexionen (N)	Lichtquelle	Wellenlängen λ_1	λ_2	λ_0	γ_1	γ_2	Φ_2/Φ_1
Steinsalz	Vier	Auerbrenner	53,6 μ	46,9 μ	51,9 μ	0,23	0,20	0,71
	Sechs	„	54,8 „	47,1 „	53,0 „	—	—	—
	Acht	„	55,0 „	47,2 „	53,4 „	0,19	0,17	0,41
	Vier	Eisenoxyd	53,1 „	46,3 „	51,9 „	0,20	0,17	0,47
	„	Nernstbrenner	53,1 „	46,4 „	52,1 „	—	—	—
	„	Bunsenbrenner	53,0 „	46,4 „	53,0 „	0,15	0,13	0,45
	„	Thor-Strumpf	53,8 „	47,0 „	52,8 „	0,19	0,17	0,55
	„	Heizkörper des Nernstbrenners	53,6 „	46,7 „	52,3 „	0,19	0,16	0,57
Sylin	Vier	Auerbrenner	61,3 „	69,6 „	62,5 „	0,074	0,084	0,63
	Sechs	„	61,8 „	70,6 „	63,8 „	—	—	—
	Acht	„	62,8 „	71,8 „	64,0 „	0,078	0,090	0,53

Wie Fig. 17 und 18 zeigen, ist die Energiekurve der Reststrahlungen von Steinsalz bei sechs- und achtfacher Reflexion merklich steiler als bei vierfacher Reflexion. Es

hängt dies mit der Abnahme des logarithmischen Dekrements zusammen, das bei 8facher Reflexion 0,19 für λ_1, 0,17 für λ_2 beträgt, während bei vierfacher Reflexion die entsprechenden Werte 0,23 bezw. 0,20 sind. In den Wellenlängen der beiden Streifen treten bei Vermehrung der Zahl der Reflexionen Verschiebungen ein. λ_1 wird bei sechsfacher Reflexion um 1,2 μ nach längeren Wellen verschoben, während bei achtfacher Reflexion nur eine weitere Verschiebung von 0,2 μ eintritt. λ_2 dagegen wird viel weniger durch die Zahl der Reflexionen (N) beeinflußt, da hier nur eine Verschiebung von 0,2 μ bezw. 0,3 μ zu beobachten ist. Im Gegensatz hierzu ist die mittlere Wellenlänge λ_0 verhältnismäßig stark von der Größe N abhängig. Sie wird nämlich bei sechs- bis achtfacher Reflexion um einen Betrag von 1,1μ bezw. 1,4μ verschoben. Φ_2 / Φ_1 wird mit zunehmender Zahl der Reflexionen kleiner, und zwar nimmt dieser Wert von 0,71 bei vierfacher Reflexion bis auf 0,41 bei achtfacher Reflexion ab. Aus dieser Abnahme läßt sich ein Schluß auf das Reflexionsvermögen des Steinsalzes für die beiden Wellenlängen λ_1 und λ_2 ziehen.

Ist nämlich E_2 bezw. E_1 die Energie der Strahlungsquelle, in diesem Falle des Auerbrenners, für die Wellenlänge λ_2 bezw. λ_1, so gilt die Beziehung:

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{E}{E_1} \left(\frac{\nu_2}{\nu_1}\right)^N$$

wo N die Zahl der Reflexion ist.

Wird als bei Verwendung derselben Strahlungsquelle Φ_2/Φ_1 kleiner bei steigendem N, so muß $\nu_2/\nu_1 < 1$ sein, d. h. das Reflexionsvermögen des Steinsalzes für den kurzwelligen Streifen ist kleiner, wie für den langwelligen.

Der Einfluß verschiedener Lichtquellen ist aus Fig. 21—24 sowohl wie aus Tabelle II zu ersehen. Geht man von der ersten Reihe (Reststrahlen von Steinsalz bei vierfacher Reflexion bei Anwendung eines Auerbrenners als Strahlungsquelle) aus, so erkennt man, daß bei der Verwendung des Eisenoxydstrumpfes, des Nernstbrenners und des Bunsenbrenners, die Maxima der Energie der Haupt- und Nebenstreifen ungefähr bei 53,0 μ bezw. 46,4 μ, d. h. 0,5 μ niedriger liegen. Bei dem Heizkörper des Nernstbrenners und dem Thorstrumpf dagegen befinden sich die Maxima annähernd an denselben Stellen, wie bei dem Auer-Strumpf. Die logarithmischen Dekremente sind durchweg kleiner als bei dem Auerbrenner.

Das Intensitätsverhältnis Φ_2/Φ_1 ist für die untersuchten Lichtquellen am größten für den Auerbrenner, woraus hervorgeht, daß in der Strahlung der Auerbrenner die kleinere Wellenlänge λ_2 relativ zur Wellenlänge λ_1 am stärksten vertreten ist.

Sylvin.

Bei Sylvin ist die Reststrahlung wesentlich homogener wie bei Steinsalz, was aus den kleinen Werten γ_1 und γ_2 hervorgeht. Eine Vermehrung der Zahl der Reflexion ergibt keine Vergrößerung der Homogenität. γ_1 bezw. γ_2 bleiben bis zur achtfachen Reflexion innerhalb der Fehlergrenzen konstant.

Bei sechsfacher Reflexion betragen die Verschiebungen

für λ_1 und λ_2 0,5 μ und 1,0 μ und bei achtfacher Reflexion 1,5 μ und 2,2 μ. Die mittlere Wellenlänge λ_0 verschiebt sich um 1,3 μ bezw. 1,5 μ bei sechs- bis achtfacher Reflexion.

Φ_2 / Φ_1 ändert sich nur unbedeutend mit Zunahme von N. Immerhin kann man aus der Abnahme von Φ_2/Φ_1 von 0,63 bis auf 0,53 schließen, daß $\nu_2 < \nu_1$ sein muß. Beim Sylvin hat also der langwellige Streifen das kleinere Reflexionsvermögen.

Die vorliegende Untersuchung hat erwiesen, daß sich auch bei Verwendung der verschiedensten Strahlungsquellen dieselben Doppelstreifen der Reststrahlung ergeben, wie bei dem Auerbrenner. Dies beweist, daß das Auftreten dieser Doppelstreifen nicht etwa auf eine selektive Emission des Auerbrenners zurückzuführen ist, wie dies neuerdings von Herrn Madelung[10] vermutet wurde.

Aber noch einige andere Umstände könnten solche Doppelstreifen vortäuschen. Man könnte auf den Gedanken kommen, daß zufällig ein breiteres Reststrahlengebiet durch selektive Absorption in der Atmosphäre in zwei Streifen geteilt wird. Gegen diese Möglichkeit spricht ja schon von vornherein das Auftreten der Doppelstreifen an den verschiedenen Reststrahlmaterialien in den verschiedensten Wellenlängengebieten. Immerhin erschien es wünschenswert, den Einfluß von Wasserdampf in der Atmosphäre, der ja hier allein in Frage kommen kann, zu untersuchen. Zu diesem Zwecke wurde die Absorption einer mit Wasserdampf gesättigten Luftstrecke von 30 cm Länge bei Zimmertemperatur

10. Madeling, Göttinger Nachrichten 1910.

untersucht und gefunden, daß die Absorption für Reststrahlen des Steinsalzes nur sehr gering war. Am besten zeigen aber die Versuche mit dem Bunsenbrenner, daß der Einfluß der Absorption des Wasserdampfes hierbei keine wesentliche Rolle spielt. Die Emission des in ihm enthaltenen Wasserdampfes muß gerade in dem Absorptionsgebiet des Wasserdampfes besonders stark sein. Es müßte demnach, falls Absorption von Wasserdampf eine wesentliche Rolle spielte, die erhaltene Intensitätsverteilung wesentlich von der mit anderen Strahlungsquellen erhaltenen abweichen. Daß dies nicht der Fall ist, beweist am deutlichsten, daß die Absorption in Wasserdampf die erhaltenen Resultate nicht wesentlich beeinflußt. Daß nicht etwa die Absorption der im Interferometer verwendeten Quarzplatten die Erscheinung des Doppelstreifen bedingt, wurde dadurch gezeigt, daß das Einschalten einer weiteren Quarzplatte von 3,5 mm Dicke in den Strahlengang nur unwesentlichen Einfluß auf die Interferenzkurven hatte.

Endlich wäre es noch denkbar, daß der Ruß, mit dem das Thermoelemente im Mikroradiometer überzogen ist, selektive Absorption zeigt. Um diese Frage zu klären, wurden Reststrahlen von Steinsalz bei vierfacher Reflexion zunächst mit einem schwarzen Körper von 100° C. als Strahlungsquelle hergestellt und dann dieselbe Reststrahlung mit einer berußten Metallfläche derselben Temperatur erzeugt. Da bei zeigte es sich, daß die Reststrahlung von Ruß nur 86 % derjenigen des schwarzen Körpers beträgt. Wollte man die Einsattelung in den Energieverteilungskurven durch eine an dieser Stelle verminderte Absorption des Russes erklären, so müßten der Unterschied zwischen der Emission

des Russes und der des schwarzen Körpers jedenfalls sehr viel größer sein.

Es bleibt also nur die Annahme übrig, daß das Auftreten der Doppelstreifen durch die selektive Reflexion des Materials hervorgerufen wird.

Zusammenfassung.

Mittels einer Interferenzmethode wurden Wellenlängenmessungen der Reststrahlung von Steinsalz und Sylvin angestellt. Bewiesen wurde, daß diese Reststrahlen aus je zwei Streifen bestehen. Durch mehrfache Reflexion ist festgestellt worden, daß bei Steinsalz der langwellige Streifen ein höheres Reflexionsvermögen besitzt, als der kurzwellige. Bei Sylvin liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt. Hier hat der kurzwellige Streifen das höhere Reflexionsvermögen (wenn auch der Unterschied geringer ist, wie bei Steinsalz).

Die Reststrahlen von Steinsalz werden homogener durch mehrfache Reflexion, während die des Sylvins merklich ungeändert bleiben.

Die Maxima der Streifen der Reststrahlen liegen annähernd an denselben Stellen bei der Verwendung verschiedener Strahlungsquellen, dagegen wird ihre Lage durch die Zahl der Reflexionen bis zu einem gewissen Grade in dem Sinne beeinflußt, daß sie mit wachsender Zahl der Reflexionen langsam nach langen Wellen wandert.

Diese Untersuchung wurde im Physikalischen Institut der Universität Berlin auf Anregung und unter Leitung von Herrn Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. Rubens ausgeführt. Für die liebenswürdige Förderung der Arbeit und das rege Interesse bin ich Herrn Geheimrat Rubens zu tiefstem Danke verpflichtet. In gleicher Weise möchte ich Herrn Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. Planck meinen herzlichsten Dank aussprechen. Dem Privat-Dozenten Herrn Dr. von Baeyer schulde ich für vielseitige Hilfe meinen aufrichtigsten Dank.

Reststrahlen von Steinsalz bei vier, sechs und acht Reflexionen.

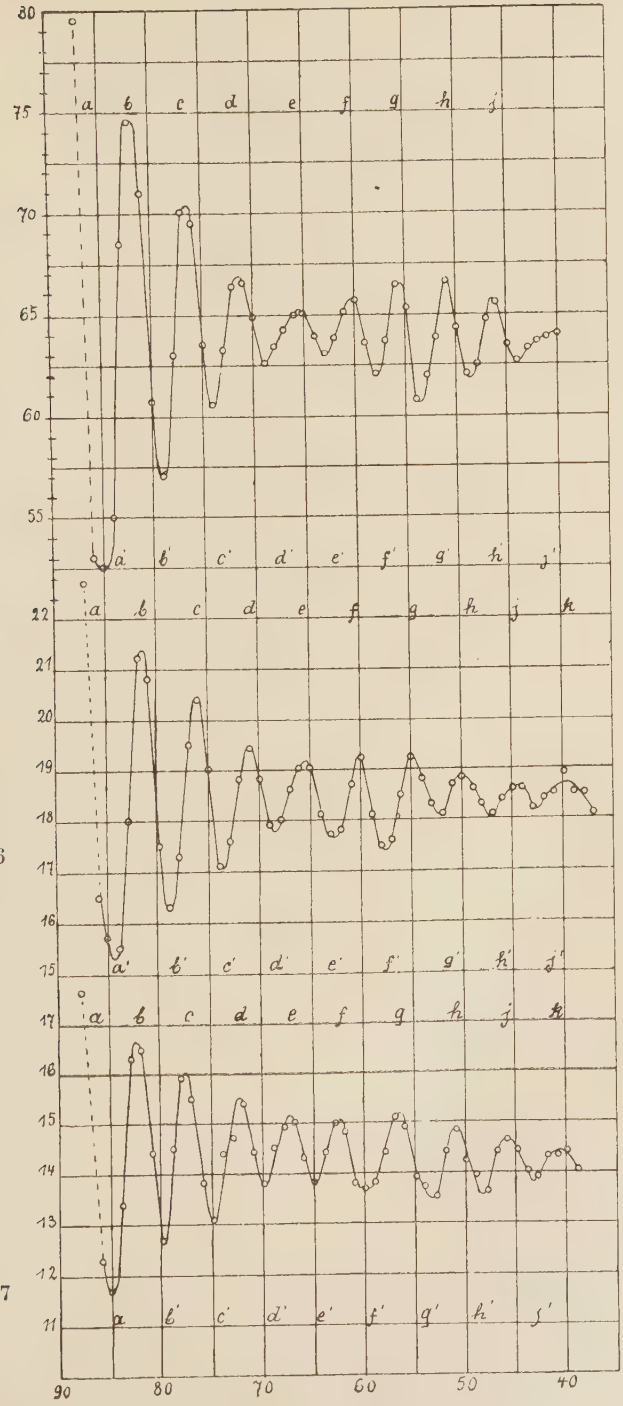


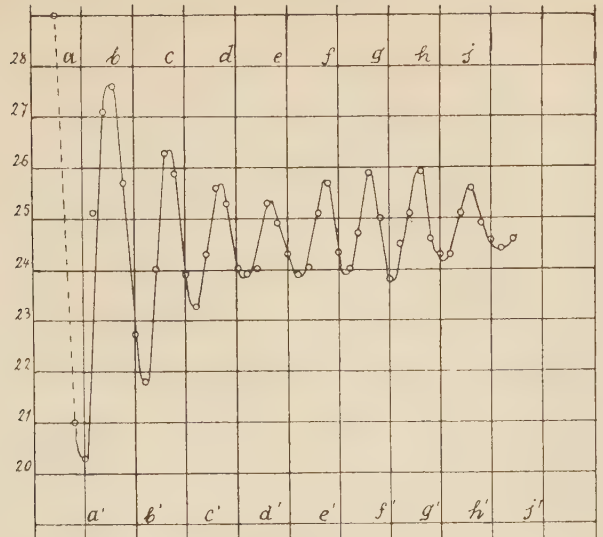
Fig. 5 vier Flächen

Fig. 6 sechs Flächen

Fig. 7 acht Flächen

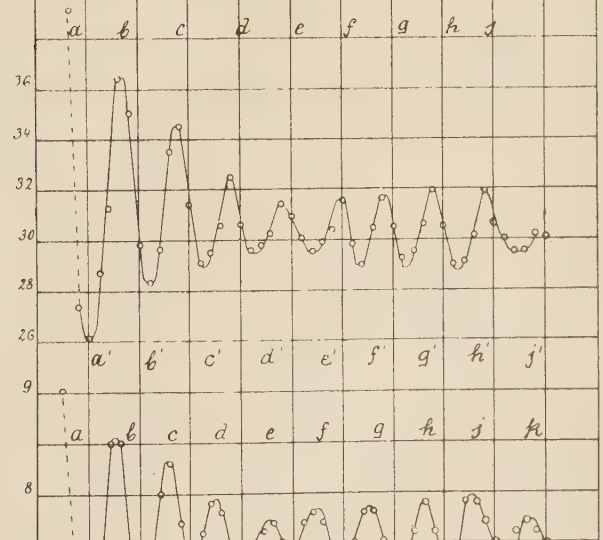
Reststrahlen von Steinsalz bei vierfacher Reflexion.

Fig. 8.



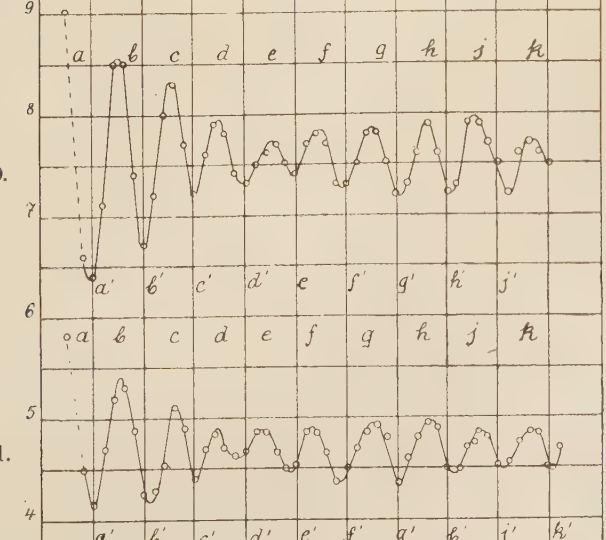
Strahlungsquelle: Eisen-Oxyd-Strumpf.

Fig. 9.



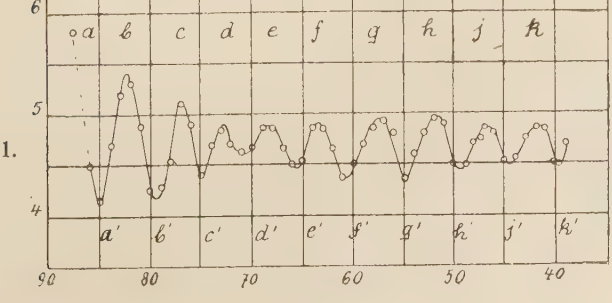
Thorium-Strumpf.

Fig. 10.



Heiz-Körper: Nernst-Brenner.

Fig. 11.



Bunsen-Brenner.

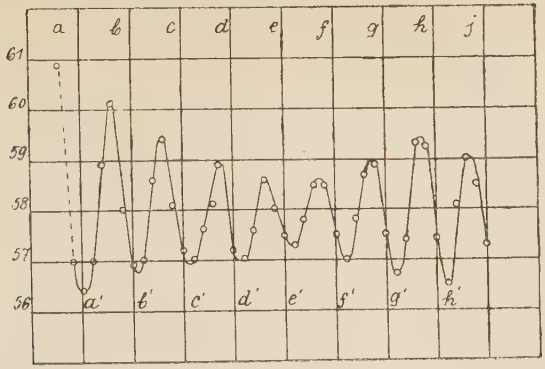
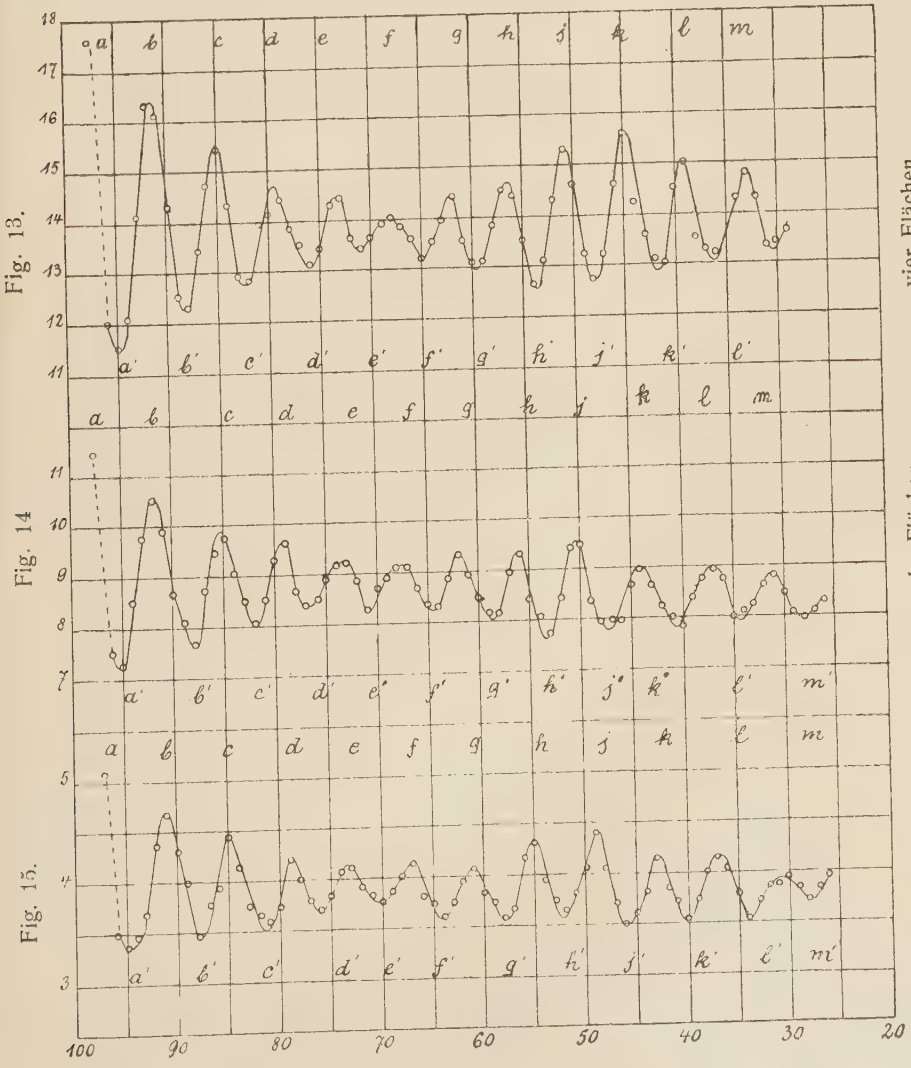


Fig. 12. Nernst-Brenner

Reststrahlen von Sylvin bei vier, sechs und acht Reflexionen.



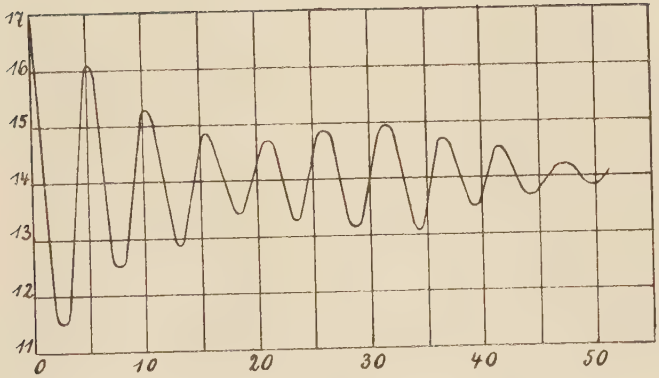


Fig. 7a.

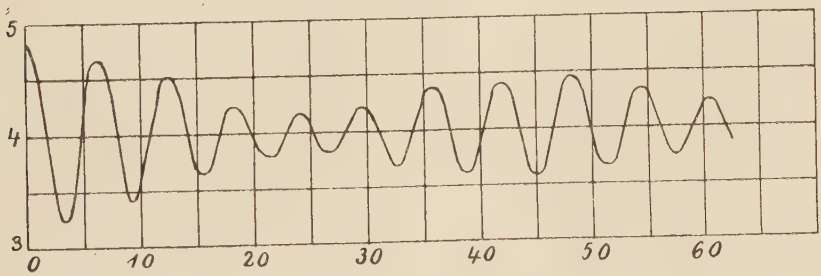


Fig. 15a.

Reststrahlen von Steinsalz.

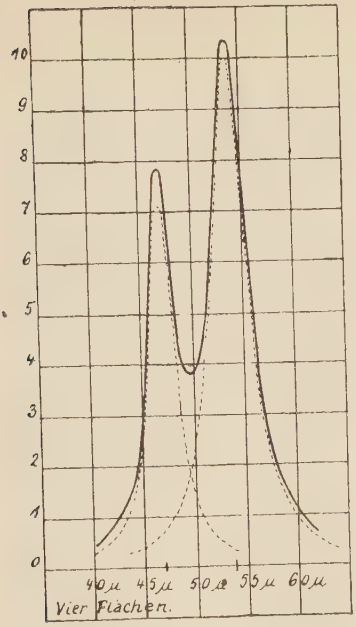


Fig. 17.

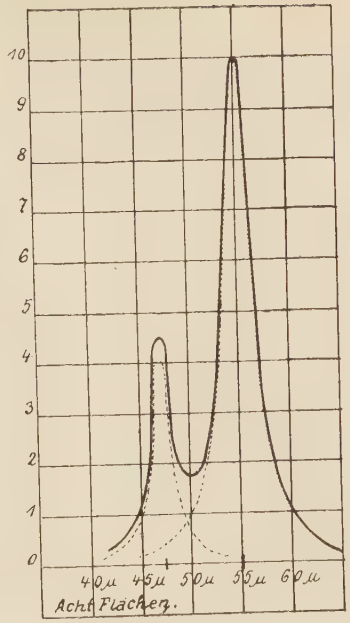


Fig. 18.

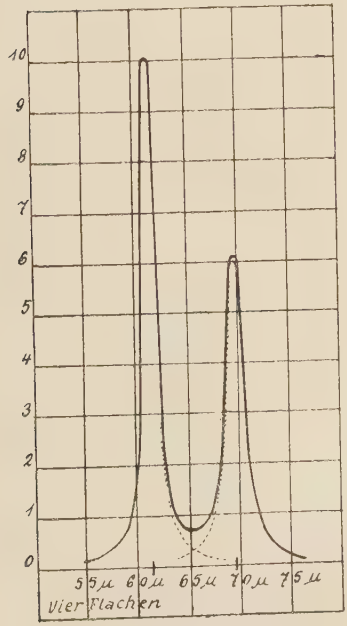


Fig. 19.

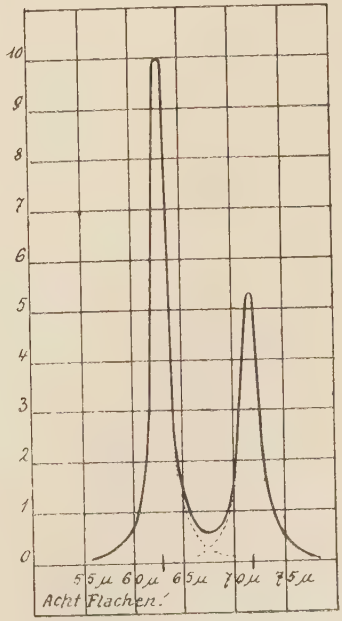


Fig. 20.

Reststrahlen von Sylvin.

Reststrahlen von Steinsalz bei Verwendung verschiedener Strahlungsquellen.

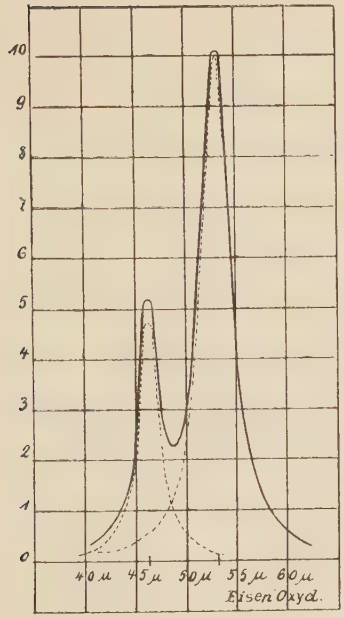


Fig. 21.

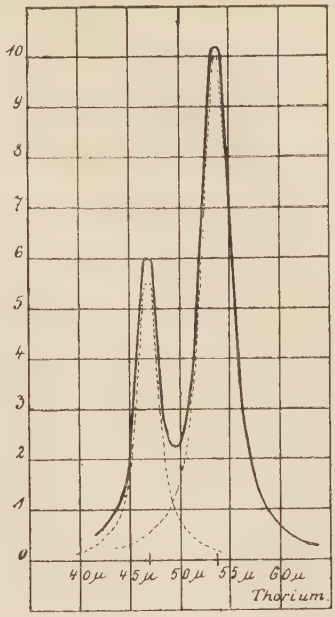


Fig. 22.

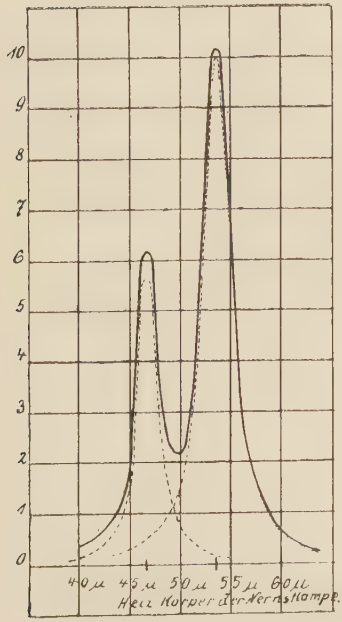


Fig. 23.

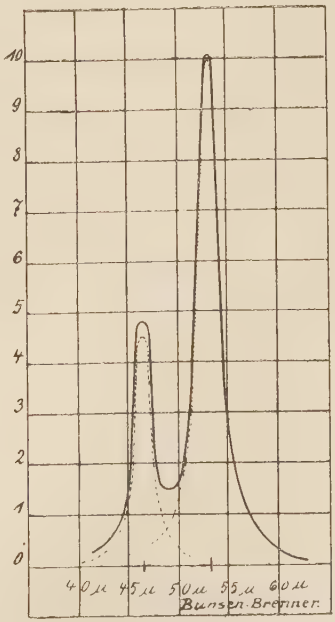


Fig. 24.

Lebenslauf.

Ich, Herbert Percival Hollnagel, wurde am 10. Juli 1882 zu Dubugue, Staat Jowa der Vereinigten Staaten als Sohn des verstorbenen Kaufmanns Hollnagel und seiner Ehefrau Margarete geb. Meyer, geboren. Ich bin evangelischer Konfession.

Von Michaelis 1896 besuchte ich die „Dubuque Highschool", die ich 1900 mit dem Zeugnis der Reife verließ. Von Michaelis 1900 bis Michaelis 1906 besuchte ich das „Massachusetts Institute of Technology", um Physik zu studieren. 1906 erwarb ich den Grad „Bachelor of Science" (S. B.) und 1909 wurde mir der Grad „Master of Science" (S. M.) in absentia verliehen, auf Grund einer Arbeit, die ich in den Jahren 1906—1908 als Assistent ausführte. Von Michaelis 1908 ab bin ich bei der philos. Fakultät der Univ. Berlin inskribiert. Ich hörte die Vorlesungen der Herren: Fischer, Henning, Laue, Nernst, Planck, Riehl, Valentiner, van t' Hoff, Warburg. Von Ostern 1909 ab arbeitete ich in dem von Herrn Prof. Rubens geleiteten physikalischen Institut der Universität. Die Promotionsprüfung bestand ich am 21. Juli 1910.

Allen meinen Lehrern, insbesondere Herrn Prof. Rubens und Herrn Prof. Planck bin ich zu großem Dank verpflichtet.